

Р. Е. Виноградов*, А. А. Борисов, А. В. Запалова¹

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва

*r_vinogradov@mail.ru

Научный руководитель — проф., канд. техн. наук Д. Е. Гусев

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ В СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА

В работе приведены результаты испытаний на низкотемпературную и высокотемпературную ползучесть сплава Ti–55,7 мас. % Ni при деформации кручением. Показана зависимость механизмов ползучести от структуры сплава и температуры испытаний.

Ключевые слова: никелид титана, ползучесть, деформация, термическая обработка, мартенситное превращение.

R. E. Vinogradov, A. A. Borisov, A. V. Zapalova

INVESTIGATION OF CREEPING PROCESSES IN ALLOYS BASED ON TITANIUM NICLIDE

The creep processes in Ti–55.7 wt. % Ni. The paper presents the results of tests for low-temperature and high-temperature creep of an alloy based on titanium nickelide under torsional deformation. The dependence of the influence of creep mechanisms on the test temperature is shown.

Key words: titanium nickelide, creep, deformation, heat treatment, martensitic transformation.

В последнее время внимание все чаще уделяется применению никелида титана в конструкционных элементах, которые, как правило, работают в деформированном состоянии, под действием постоянно приложенной нагрузки, в результате которой возможно развитие ползучести. Однако процессы ползучести в сплавах на основе никелида титана в литературе изучены мало, поэтому данный вопрос остается актуальным.

В настоящей работе исследования проводили на проволоке диаметром 2,25 мм из сплава Ti–55,7 мас. % Ni, полученного по промышленной технологии.

Для изучения ползучести проволоочные образцы деформировали на универсальном приборе кручения УПК-1. Низкотемпературную ползучесть исследовали при нормальной температуре, а при исследовании высокотемпературной ползучести образцы нагревали в воздушной атмосфере до заданной температуры (450, 500 и 550 °С). Для этого нагружающее устройство прибора кручения вместе с образцом помещали в рабочее пространство печи, заранее разогретой до заданной температуры испытаний.

Как показывают результаты испытаний, за 2 ч при температуре 450 °С и напряжениях 200 МПа накапливается минимальная величина деформации $\approx 5\%$. Повышение температуры испытаний и напряжений снижает время, необходимое для деформации образцов, и позволяет накапливать деформацию до 20 %. По результатам испытаний была определена средняя скорость ползучести. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние термической обработки в течение 1 ч на параметры, описывающие процесс кратковременной ползучести (при постоянном напряжении $\tau = 200$ МПа)

№	Режим термической обработки	Скорость установившейся ползучести $\dot{\gamma}$, с ⁻¹		
		при 450 °С	при 500 °С	при 550 °С
1	Без обработки	$6 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
2	450 °С	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
3	500 °С	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
4	550 °С	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
5	700 °С	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$

На скорость накопления деформации в сплаве ТН1 влияет структура сплава, поэтому часть образцов перед испытаниями была предварительно подвергнута отжигу при температурах 450, 500, 550 и 700 °С в течение 1 ч. В интервале температур 450...550 °С в сплаве проходят процессы полигонизации, а при более высоких температурах — процессы рекристаллизации. Кроме того, изменяется объемная доля интерметаллидов, богатых никелем, присутствующих в В2-матрице сплава.

Во время испытаний при 450 °С после отжига при 450 °С скорость ползучести снижается из-за выделения частиц Ti_3Ni_4 , которые являются эффективными барьерами для переползания и скольжения дислокаций. Термическая обработка при 500 и 550 °С практически не оказывает влияния на ползучесть, т. к. в этих случаях объемная доля частиц Ti_3Ni_4 должна быть значительно меньше, чем после отжига при 450 °С.

После отжига при 700 °С во время испытаний при 450 и 500 °С происходит выделение мелких частиц Ti_3Ni_4 , из-за чего резко снижается скорость ползучести. При увеличении температуры испытаний до 550 °С выделяющиеся частицы увеличиваются в размерах, а их объемная доля уменьшается, поэтому их влияние на затруднение процессов ползучести снижается и скорость ползучести не меняется.

Зависимость скорости ползучести от температуры испытаний и приложенных напряжений подчиняется уравнению Аррениуса:

$$\dot{\gamma} = A\tau^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right).$$

С ростом температуры испытаний и напряжений роль отдельных механизмов ползучести меняется, что сказывается на величине показателя n . Так, при температуре 450 °С показатель напряжения близок к величине 2,8, а при температурах 500 и 550 °С он равен 1,5 и 1,7. Таким образом, при температуре 450 °С основную роль играет дислокационное скольжение.

Основным механизмом формоизменения материала при температуре 550 °С является зернограничное проскальзывание, контролируемое диффузией по границам зерен (модель Кобле). Процессы объемной диффузии, характерные для ползучести Набарро — Херринга, за столь короткое время испытаний не успевают дать вклад в накопление деформации.

Отжиг при 700 °С приводит к тому, что из-за роста размера зерна и уменьшения протяженности границ зерен механизм зернограничного проскальзывания становится менее эффективным. При этом роль дислокационных механизмов ползучести возрастает. Об этом можно судить по увеличению показателя напряжения n , который после отжига образцов при 700 °С стал равным $n = 3,6$ при температуре испытаний 450 °С и $n = 2,4...2,6$ при температуре испытаний 500 °С.

Исследование свойств эффекта памяти формы на образцах в исходном состоянии показало, что температуры восстановления формы находятся в интервале (+2...+23) °С. После испытания на ползучесть при 450 °С, из-за выделения интерметаллидов, происходит обогащение В2-фазы титаном и повышение температур восстановления формы. С увеличением температуры испытаний до 500 и 550 °С температура восстановления формы снижается, что связано с растворением частиц. В образцах, подвергнутых отжигу при 450 °С, выше объемная доля богатых никелем интерметаллидов и ниже концентрация дефектов кристаллического строения, чем у образцов в исходном состоянии.

Поэтому они обладают более высокими температурами восстановления формы. Повышение температуры испытаний предварительно отожженных при 450 °С образцов приводит к резкому снижению температур восстановления формы. Аналогичные изменения свойств эффекта памяти формы происходят и для образцов, предварительно отожженных при 500 и 550 °С. Проведение вакуумного отжига при 700 °С вызывает полное растворение богатых никелем интерметаллидов и формирование рекристаллизованной структуры В2-фазы, по этой причине температуры значительно ниже 0 °С.

Изучение низкотемпературной ползучести проводили на образцах после отжига при 450 °С, в результате которого сплав при температуре 21 ± 2 °С находится в сверхупругом состоянии.

При напряжениях 175 и 200 МПа наблюдали малое количество накопленной деформации — 1,8 и 2,4 % за 7 дней. Испытания продолжались в течение двух недель, пока не стало понятно, что скорость ползучести стала очень низкой и больше не происходит увеличения деформации, после чего приложенные напряжения были полностью сняты. Накопленная по мартенситному механизму деформация была устранена в течение 3 ч после снятия напряжений. При напряжении 225 МПа деформация накапливается более интенсивно из-за того, что это напряжение находится выше предела упругости. Общая деформация после восьми дней испытаний составила 5,9 %. Снятие напряжений приводит к частичному восстановлению формы — процент остаточной деформации составил 0,36 % после суток выдержки без нагрузки, однако в процессе последующего нагрева до 100 °С деформация восстанавливается полностью.

При напряжении 250 МПа поведение сплава схоже с тем, что было при 225 МПа, однако процессы мартенситного превращения, вызванные напряжением, протекают в материале быстрее. Мгновенная деформация в этот раз составила 4 % и за час возросла до 5,9 %, после чего скорость ползучести замедлилась и в течение восьми дней достигла значения 6,1 %.

Таким образом, накопление деформации в образцах при низкотемпературной ползучести происходит из-за образования в матрице сплава пластин мартенсита, ориентированных в направлении действия внешних напряжений. Накопление деформации останавливается из-за ограничений, связанных с возможностью накопления кристаллографически обратимой деформации (5...6 %) при мартенситном превращении.